DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2018.06.01

黄河源区气候变化特性分析

吴 晗, 董增川, 蒋飞卿, 张 延
(河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 全球气候变化改变了水资源现状,黄河源区因其径流量偏枯的状态使得气候变化因素研究尤为重要。为研究黄河源区气候变化特性,选取12个国家气象站点1960-2016年近60年气温与降水量资料,综合分析黄河源区年内与年际气候变化特性。运用有序聚类分析法、Mann-Kendall检验法、滑动t检验法、线性趋势法、Spearman秩次相关检验法和Morlet小波分析法,得到最终结论:黄河源区四季均温增长态势均显著,冬季增长幅度最大;降水量在春、冬季呈显著增长态势,而夏秋季无明显下降趋势。年均气温序列突变点为1997年;降水量无明显的突变点。年均气温呈显著的递增趋势;而降水量序列无明显的递增趋势。年均气温存在着10、5与23a的年际变化周期情况;降水量存在着28、11与8a的年际变化周期情况。

关键词: 气候变化; 突变性; 趋势性; 周期性; Mann-Kendall检验; Morlet小波分析; 黄河源区
中图分类号:P467 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2018)06-0001-07

Analysis of climate change in the Source Regions of the Yellow River

WU Han, DONG Zengchuan, JIANG Feiqing, ZHANG Yan
(*College of Hydrology and Water Resources, HoHai University, Nanjing* 210098, *China*)

Abstract: Global climate change has changed the current situation of water resources. The study of climate change is particularly important in the source regions of the Yellow River due to its dry runoff. In order to study the characteristics of climate change in the source regions of the Yellow River, temperature and precipitation data from 12 national weather stations from 1960 to 2016 in the past 60 years were selected to comprehensively analyze the annual and interannual climate change characteristics with the methods of the ordered clustering, Mann-Kendall test, sliding T, linear fitting, Spearman and Morlet wavelet methods. The results show that the growth trend of the average temperature in the four seasons is significant with the largest increase in winter. Precipitation in spring and winter shows a significant growth trend, while no significant downward trend in summer and autumn. The abrupt change of annual average temperature is found in 1997 , whereas there is no obvious abrupt change of precipitation. In addition, the temperature has an obvious increasing trend, while the precipitation sequence shows no obvious increasing trend. The climate change interval analysis reveals that the annual average temperature fluctuates significantly with the intervals of 10, 5 and 23 years, and the annual precipitation fluctuates with the intervals of 28, 11 and 8 years, respectively.

Key words: climate change; abrupt change; variation trend; cycle condition; Mann-Kendal; Morlet wavelet analysis; the Source Regions of the Yellow River

1 研究背景

19世纪以来,全球气候变化改变了全球水循环的现状,也对降水、蒸发、径流等产生了直接的影响,进而改变了水资源的时空分布,对人民生活与社会经济等造成重大影响[1]。黄河源区由于其特殊的地理位置,长期以来一直为国内外许多学者所研究。通过研究分析黄河源区气候变化,为后期径流影响、

收稿日期:2018-04-09; **修回日期**:2018-06-18
基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0401306);河海大学开发项目:龙羊峡水库年与多年调节库容研究开发项目(20168059416)
作者简介:吴 晗(1995-),女,江苏扬州人,硕士研究生,主要从事水资源规划与管理方面研究。
通讯作者:董增川(1963-),男,山西运城人,博士,教授,博士生导师,主要从事水资源规划与管理研究工作。

水资源演变规律、生态环境改善、植被生物保护等提供研究背景与科学依据。气候变化问题是现今社会发展中环境变化的重要问题,受到各领域学者及群众的广泛关注[2]。在当前的大背景下,研究气候变化规律与趋势,是保护水资源、维护人类社会平衡发展的重要途经之一。

黄河源区指龙羊峡水库以上的黄河流域,位于青藏高原东北部的腹地,包含青海、四川、甘肃 3 个省的部分城市,流域总面积 13.2×10^4 km^2,研究区域如图 1。黄河源区整体地势较高、气候严寒,属于高原大陆性气候。其冰川融水、雨水和冻土融水是地表水资源的重要来源,并影响着地表径流的年际变化与未来趋势[3],是黄河的主要产流方式。近年来研究表明:受气候变化和人类活动的共同影响,源区的冻土层厚度减小、冰川消融、地下水水位不断下降、湖泊退缩与土地荒漠化等形势日益严重,促使黄河源区的径流量大多为偏枯状态[4-6]。在当地气候情况和下垫面条件的共同影响下,源区的径流量出现不同程度的减少,而其中影响最大的就是气候变化因素。同时,径流量的变化也引起了下游的供水、发电、航运、生态、水资源分布等一系列问题,给当地人民的生活带来了许多影响[7]。

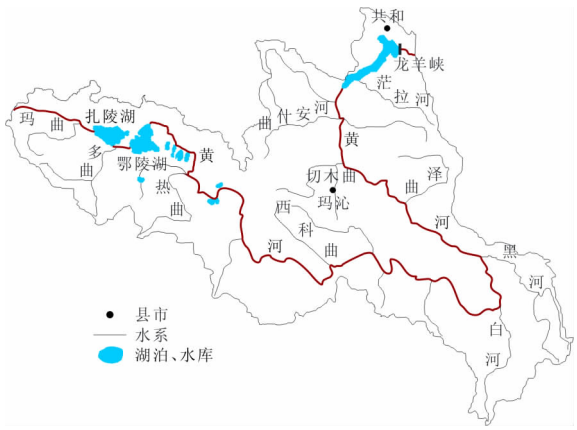


图 1 黄河源区水系图

2 资料来源和研究方法

2.1 资料来源

选取黄河源区 12 个国家气象站点 1960 - 2016 年逐月平均气温资料与降雨资料作为黄河源区流域气象资料,气象站点分别为 56021 曲麻莱、56029 玉树、56033 玛多、56034 清水河、56038 石渠、56046 达日、56065 河南、56067 久治、56074 玛曲、56079 若尔盖、556173 红原、52943 兴海,数据均来源于中国气象数据网,测站的基本信息如表 1 所示。

表 1 黄河源区气象站点基本信息

区站号	台站名称	经度 E/(°)	纬度 N/(°)	海拔/m
56021	曲麻莱	95.5	34.6	4231.2
56029	玉树	97.0	33.0	3681.2
56033	玛多	98.2	34.9	4272.3
56034	清水河	97.1	33.8	4415.4
56038	石渠	98.1	33.0	9200.0
56046	达日	99.7	33.8	3967.5
56065	河南	101.6	34.7	8500.0
56067	久治	101.5	33.4	3628.5
56074	玛曲	102.1	34.0	3471.4
56079	若尔盖	103.0	33.6	3439.6
56173	红原	102.6	32.8	3491.6
52943	兴海	100.0	35.6	3323.2

2.2 分析方法

根据搜集到的黄河源区 1960 - 2016 年的气象资料,计算年均气温与年降雨量并组成年均气温与年降雨量序列,季节划分按照春季(3 - 5 月)、夏季(6 - 8 月)、秋季(9 - 11 月)、冬季(12 - 翌年 2 月)以此计算对应季节的月均温与降水量序列。序列的突变性分析首先利用有序聚类分析法和 Mann - Kendall 检验法初步得出序列的突变点,然后利用滑动 t 法检验突变点是否合理以综合确定突变点年份。本文使用线性趋势法、Mann - Kendall 检验法和 Spearman 秩次相关检验法对序列进行趋势性分析,并检验其显著性,最后综合各方法的结果对趋势性变化进行总结[8-13]。周期性分析运用 Morlet 小波分析,根据计算出的小波系数实部、小波系数模方与小波方差,绘制小波系数等值线图、小波系数模方图与小波方差图,判断序列不同尺度的周期情况、周期结构与周期强弱[14-15]。

3 结果与分析

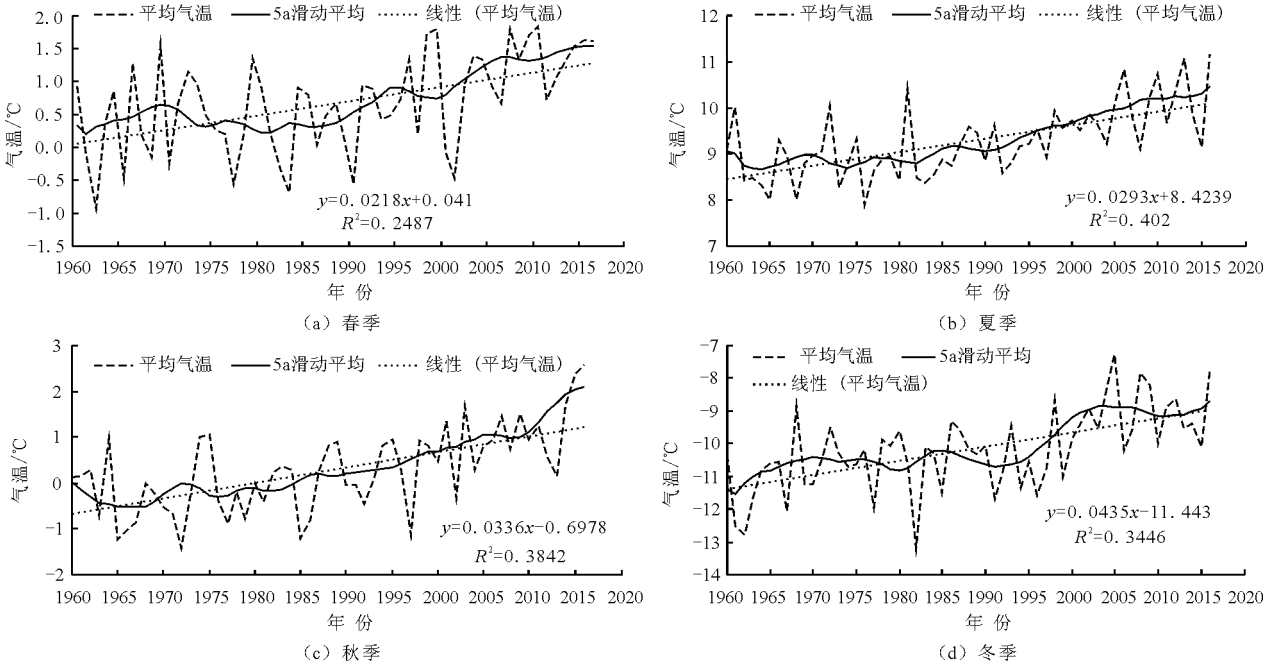
3.1 年内气候特性分析

3.1.1 *年内气温趋势分析* 对 1960 - 2016 年黄河源区春、夏、秋、冬四季的月均温数据进行线性趋势法和 5 a 滑动平均法分析,结果如图 2 所示。

由图 2 可知,四季月均气温均呈增长态势。其中,冬季的月均温线性变化幅度最大,为 0.0435 ℃/a,秋季次之为 0.0336 ℃/a,春季则最小为0.0218 ℃/a。由此可见,黄河源区四季气温的增长态势均显著,其中冬季月均温增长幅度最大,春季月均温增长幅度最小。分析结果与罗栋梁等[16]的结果一致,其中冬季升温最为明显与杨特群等[17]、李晓英等[18]的结果一致,可见冬

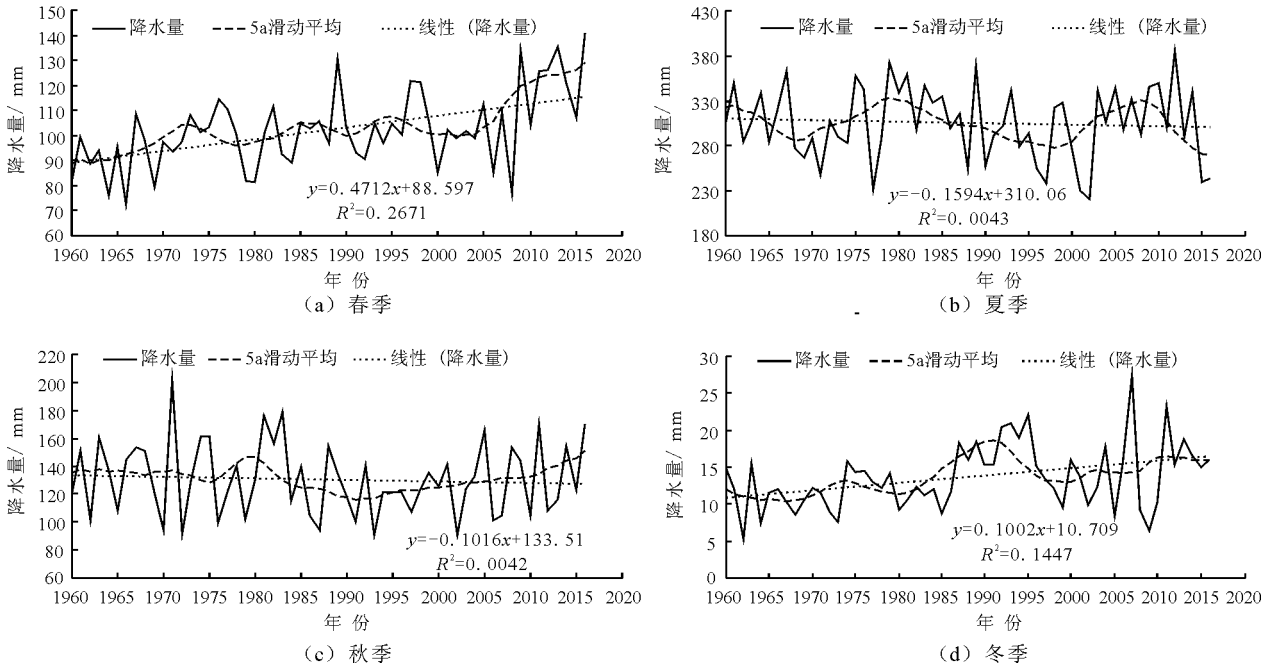
季升温对年均气温影响贡献最高。

3.1.2　年内降水量趋势分析　计算出 1960 – 2016 年黄河源区春、夏、秋、冬每个季节的降水量,并同样对其进行线性趋势法和 5 a 滑动平均法分析,结果如图 3。



（a）春季　（b）夏季　（c）秋季　（d）冬季

图 2　1960 – 2016 年黄河源区四季月平均气温变化趋势



（a）春季　（b）夏季　（c）秋季　（d）冬季

图 3　1960 – 2016 年黄河源区四季降水量变化趋势

由图 3 可知,夏季和秋季的降水量线性变化幅度为负值,分别为 – 0.1594 mm/a 与 – 0.1016 mm/a;春季和冬季的降水量线性变化幅度为正值分别为 0.4712 mm/a 和 0.1002 mm/a。由此可见,黄河源区的降水量在春季和冬季均呈显著的增长态势,其中春季增长最为显著;而夏季和秋季降水量的下降趋势均不显著。分析结果与罗栋梁等[16]、李晓英等[18]的结果一致,其中降水量的增加量主要发生在春季,对年降水量变化贡献最高。

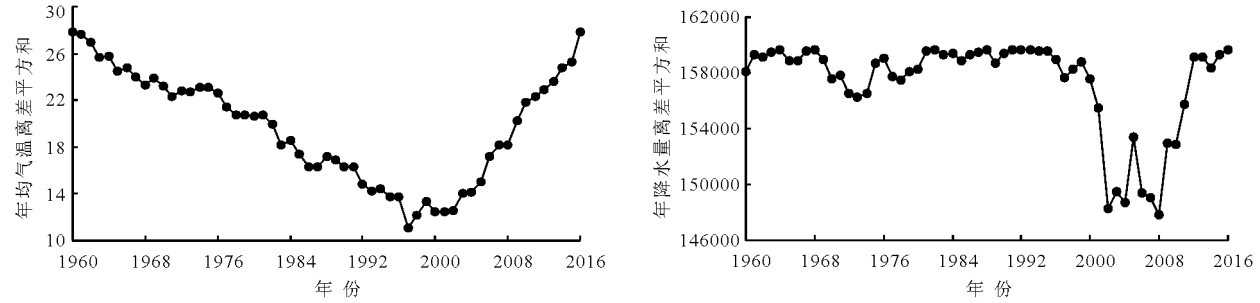
3.2　年际气候特性分析

3.2.1　年际气候突变性分析　首先采用有序聚类分析法分析黄河源区 1960 – 2016 年年均气温和年降水序列的突变点。计算年均气温序列和年降水序列各个年份数据的离差平方和,并在同一坐标轴下

点绘离差平方和逐年变化过程,初步认定离差平方和最小值对应的年份即为突变年份。点绘出离差平方和逐年变化过程,如图 4 所示。

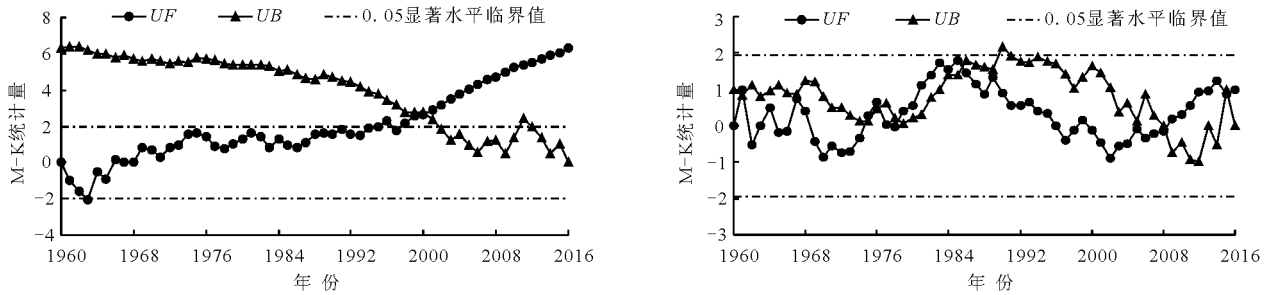
由图 4 可以看出,黄河源区年均气温与年降水量序列均存在离差平方和的最小值。其中,年均气温离差平方和最小值对应的年份为 1997 年,年降水量离差平方和最小值对应的年份为 2008 年。因此初步判定,黄河源区气温突变年份为 1997 年,年降水量突变年份为 2008 年。

其次,采用 Mann – Kendall 检验法分析黄河源区年均气温与降水量的突变点。首先,计算出不同年份下对应的 UF 与 UB 值,并在同一坐标系中点绘 UF 与 UB 两条曲线以及 $y = u_{\frac{\alpha}{2}}$ 与 $y = -u_{\frac{\alpha}{2}}$ 两条临界直线,其中临界直线的显著性水平 α 选取为 0.05,如图 5 所示。如果两条曲线在临界范围内存在交点,那么该点对应的年份即为突变点。



(a) 年均气温 (b) 年降水量

图 4 1960 – 2016 年黄河源区气候离差平方和过程图



(a) 年均气温 (b) 年降水量

图 5 1960 – 2016 年黄河源区气候 M – K 检验变化过程图

由图 5(a)可知,年均气温 UF 与 UB 两条曲线存在交点为 2000 年,然而交点不在置信区间内未通过 0.05 的显著性水平。观察 UF 曲线可知,1966 年以后年均气温序列的值都大于 0,表明年均气温均呈增长态势,且 1998 年之后年均气温序列的值超过显著性水平 0.05 的临界线,证明 1998 年之后黄河源区的气温开始显著上升。

由图 5(b)可知,年降水量变化的波动较大,UF 与 UB 两条曲线存在交点为 1961、1974、1976、1978、1985、2008、2014、2015 年,且均通过 0.05 的显著性水平。观察 UF 曲线可知,1975 – 1996 年降水量序列的值大于 0,表明降水量呈增长态势,1997 – 2008 年序列的值小于 0,表明降水量呈减少态势,而 2008 年发生突变之后序列的值大于 0 又呈增长态势。

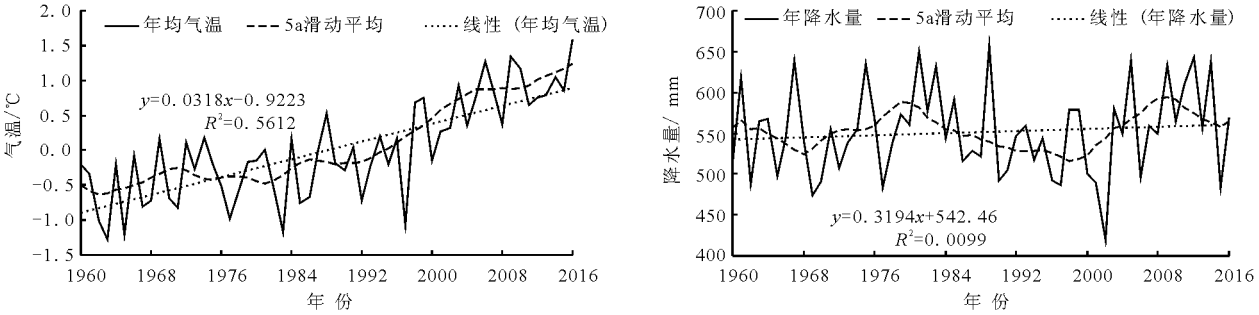
根据以上分析发现有序聚类法和 Mann – Kendall 检验法初步计算得到的突变点所在年份不完全一致,因此最后采用滑动 t 检验法对以上两种方法计算出来的突变年份进行显著性检验。将初步选定的突变年分设为基准年,分别计算前后两个序列的均值与方差,得出统计量 t 并判断其显著性,检验结果见表 2。

表 2 滑动 t 检验突变年份显著性结果

分类	突变点年份		统计量 t		突变点显著性	
	有序聚类	M – K 检验法	有序聚类	M – K 检验法	有序聚类	M – K 检验法
年均温	1997		– 7.34		显著	
		1961		– 0.73		不显著
		1974		– 1.07		不显著
		1976		– 0.55		不显著
降水量	2008	1978	– 1.94	– 0.79	不显著	不显著
		1985		0.30		不显著
		2008		– 1.94		不显著
		2014		– 0.39		不显著
		2015		0.66		不显著

由表 2 可知,采用滑动 t 检验法检验有序聚类分析法和 Mann – Kendall 检验法初步的得出的突变点,年均气温突变点显著性较好为 1997 年,与罗栋梁[16]等人的结果一致,且通过了 0.01 的置信度检验。而年降水量的突变点显著性都较差,无明显的突变点。

3.2.2　年际气候趋势性分析　首先采用线性趋势率法和 5 年滑动平均法,点绘黄河源区 1960 – 2016 年年均温和年降水量的过程,添加线性趋势线及 5 年滑动平均变化过程线,如图 6 所示。



（a）年均气温　　（b）年降水量

图 6　1960 – 2016 年黄河源区气候及滑动平均变化过程图

由图 6(a)可知,黄河源区年均气温呈显著的增长态势,线性变化幅度为 0.0318℃/a。由图 6(b)可知,黄河源区降水量的增长趋势较不显著,线性变化幅度为 0.3194mm/a。分析结果与白路遥等[19]的结果一致,即黄河源区年均气温与年降水量均呈增长态势,其中年均温增长显著,而年降水量序列在近 20 年增加趋势显著,即图 6(b)中可明显看出 20 世纪以来降水量呈现明显的增长态势。

采用 Spearman 秩次相关检验法和 Mann – Kendall 检验法对黄河源区的年均气温和年降水量进行趋势性检验,选择显著性水平 α 值为 0.01,相关检验结果如表 3 所示。

表 3　Spearman 和 Mann – Kendall 秩次相关检验法检验结果

分类　系列年份	Spearman 统计量 T	趋势性	M – K 统计量 U	趋势性
年均温1960 – 2016	– 8.466	显著	6.3056	显著递增
降水量1960 – 2016	– 0.932	不显著	0.9844	递增不明显

由表 3 可以看出,黄河源区年均气温序列的 Spearman 统计量 T 值与 M – K 统计量 U 值都大大超过了 0.01 的临界值,说明年均气温递增趋势特别显著。而黄河源区年降水量序列的 Spearman 统计量 T 值与 M – K 统计量 U 值均不显著,说明年降水量无明显的递增趋势。该结果与线性趋势法分析的结果相一致。

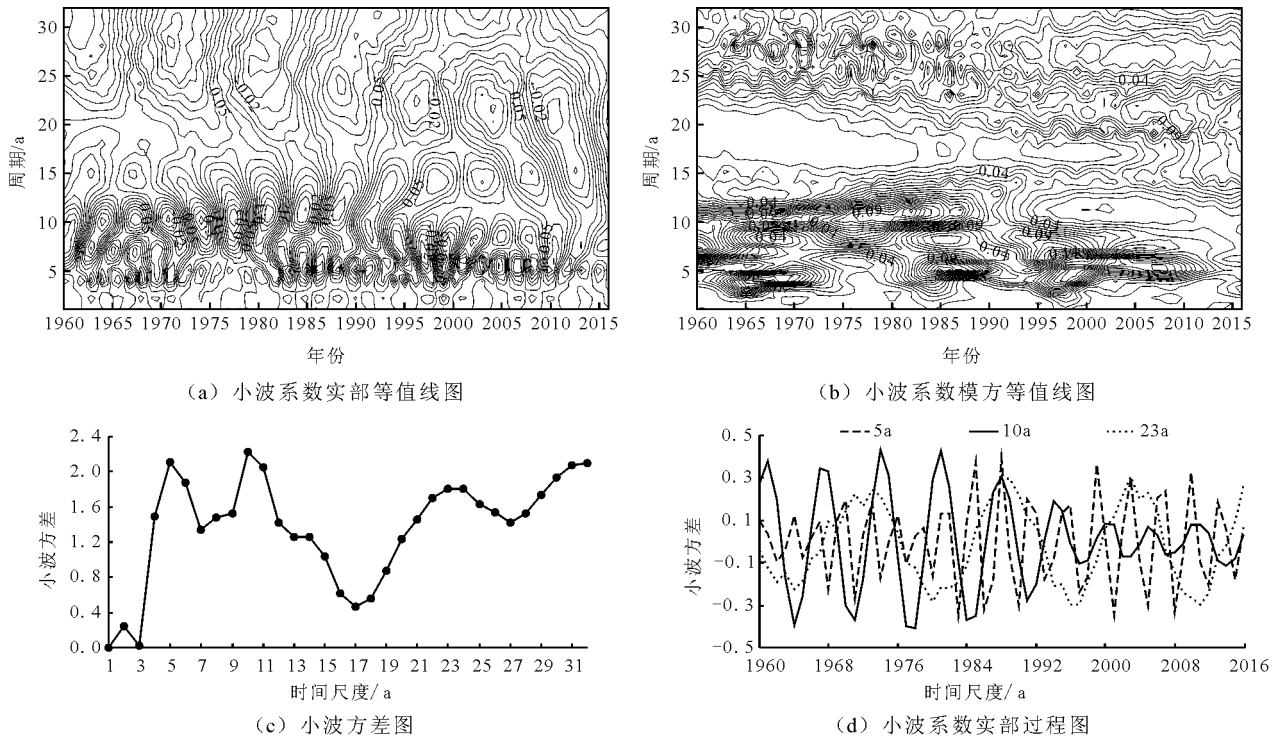
3.2.3　年际气候周期分析　对黄河源区的年均气温和年降水量序列都分别进行 Morlet 小波系数实部、模方和小波方差分析。首先,将序列的数据格式进行转化,再运用 Matlab 软件消除或减小该序列的边界效应,最后计算新序列小波系数实部与其模方和方差,并绘制小波系数实部等值线图、小波系数模方等值线图与小波方差图,以此分析年均气温和年降水量序列的周期情况。年均气温结果如图 7,年降水量结果如图 8。

由图 7(a)可知,黄河源区年均温序列存在着 18 ~ 29、8 ~ 15 以及 3 ~ 7 a 的 3 种尺度的振荡周期,其中 18 ~ 29 a 尺度上出现了高 – 低温交替的准 3 次震荡且具有全域性,8 ~ 15 a 的尺度上出现了准 9 次震荡。观察图 7(b)可以分析出不同周期的震荡能量,其中 18 ~ 29 a 尺度的周期变化能量较弱,但周期分布较明显具有全局性;8 ~ 15 a 尺度的周期变化能量最强,周期分布最明显,但具有局部性 20 世纪 90 年代前比较明显;3 ~ 7 a 尺度的周期变化能量也较强,周期分布很明显,也是具有局部性 1975 年之前与 1985 – 2010 年之间比较明显。

图 7(c)小波方差图中存在着 3 个明显的峰值情况,依次对应于 10、5 与 23 a。其中,最大的峰值对应着 10 a 的时间尺度,说明 10 a 左右受信号扰动最大周期震动最强,是年均气温序列变化的第一主周期;5 a 为第二峰值,即为年均气温序列的第二主周期;23 a 为第三峰值,即为年均气温序列的第三主周期。

图 7(d)反映出不同的时间尺度下年均气温序列的平均周期及高 – 低温变化特征,可以看出在 10 a 特征时间尺度上年均气温的平均周期为 6.5 a 左右,在 5 a 特征时间尺度上年均气温的平均周期为 3.5 a 左右,在 23 a 特征时间尺度上年均气温的平均周期为 14 a 左右。与刘光生等[20]分析的黄河源

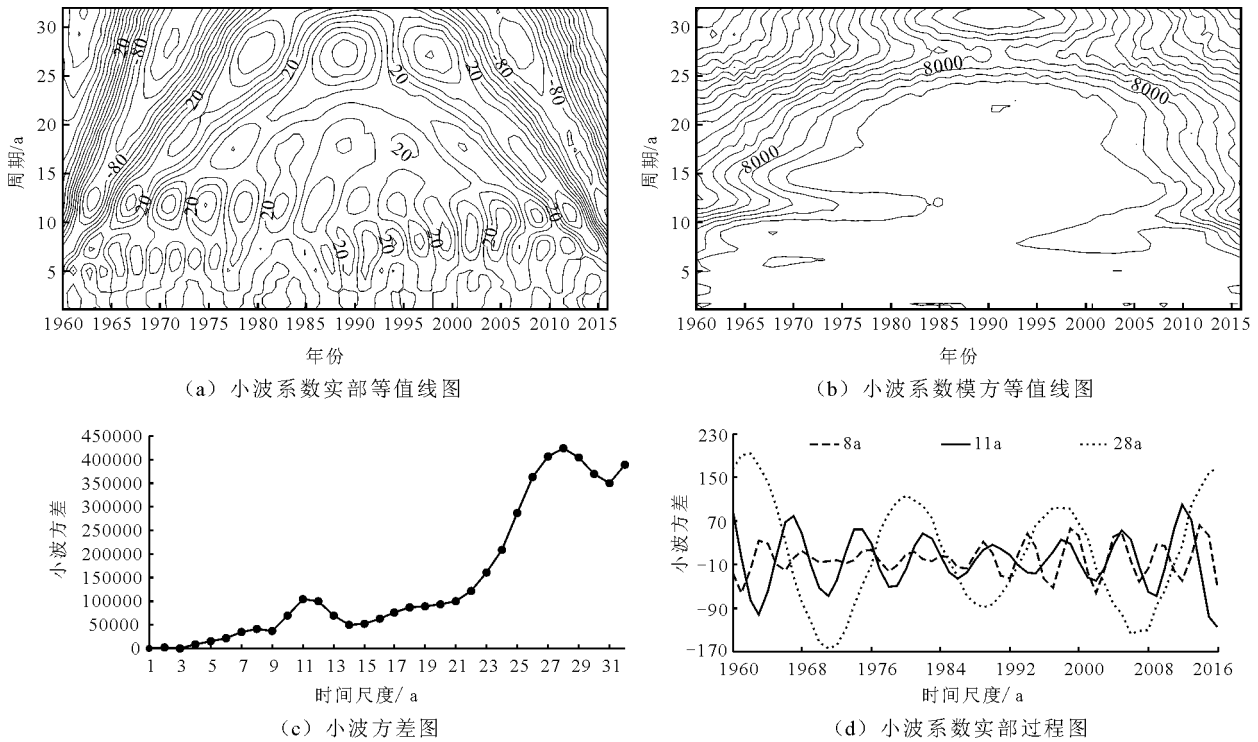
区年均气温存在的 24 ~ 28、10 ~ 12、5 ~ 8 a 尺度的年际周期变化基本一致。



(a) 小波系数实部等值线图　(b) 小波系数模方等值线图

(c) 小波方差图　(d) 小波系数实部过程图

图 7　1960 – 2016 年黄河源区年均气温小波分析



(a) 小波系数实部等值线图　(b) 小波系数模方等值线图

(c) 小波方差图　(d) 小波系数实部过程图

图 8　1960 – 2016 年黄河源区年降水量小波分析

同样由图 8(a)可知,黄河源区降水量序列存在着 22 ~ 32、9 ~ 14 以及 6 ~ 9 a 3 种尺度的振荡周期,其中 22 ~ 32 a 尺度上出现了降水量多 – 少交替的准 5 次震荡且具有全域性,9 ~ 14 a 的尺度上出现了准 9 次震荡。观察图 8(b)可以分析出不同周期的震荡能量,其中 22 ~ 32 a 尺度的周期变化能量最强,且周期分布最明显,具有全局性;9 ~ 14 a 尺度的周期变化能量较弱,周期分布较明显且具有局部性

80 年代前较明显;6 ~ 9 a 尺度的周期变化能量最弱,具有局部性 1995 年之后较明显。图 8(c)小波方差图中存在着 3 个峰值情况,依次对应于 28、11 与 8 a。其中,最大的峰值对应着 28 年的时间尺度,说明 28 a 左右受信号扰动最大周期震动最强,是降水量序列变化的第一主周期;11 a 为第二峰值,即为降水量序列的第二主周期;8 a 为第三峰值,即为降水量序列的第三主周期。由图 8(d)同样可以看出在 28 a 特征时间尺度上降水量的平均周期为 20 a 左右,在 11 a 特征时间尺度上降水量的平均周期为 7.5 a 左右,在 8 a 特征时间尺度上年降水量的平均周期为 5 a 左右。与刘光生等[20]分析的黄河源区年降水量存在的 27 ~ 28、10 ~ 11、8 ~ 11 a 尺度的年际周期变化一致性较高。

4　结　论

(1)年内气候特性分析选取黄河源区 1960 - 2016 年春夏秋冬四个季节的月均气温序列和降水量序列,对其进行线性趋势和 5 a 滑动平均分析,结果显示黄河源区四季气温的增长态势较显著,其中冬季月均气温增长幅度最大为 0.0435℃/a,春季月均气温增长幅度最小为 0.0218℃/a;降水量在春季和冬季均呈显著的增长态势,其中春季增长最为显著,为 0.4712 mm/a;而夏季和秋季降水量的下降趋势均不显著。

(2)年际气候突变性分析通过采用滑动 t 检验法,检验有序聚类分析法和 Mann - Kendall 检验法初步得出的突变点的显著性水平,得到黄河源区 1960 - 2016 年年均气温序列突变点显著性较好为 1997 年,且通过了 0.01 的置信度检验;而年降水量的突变点显著性较差,无明显的突变点。

(3)年际气候趋势性分析分别采用线性趋势法、Spearman 秩次相关检验法和 Mann - Kendall 检验法综合分析黄河源区 1960 - 2016 年年均气温和年降水量序列并进行显著性检验,结果显示年均气温呈递增趋势且大大超过临界值,说明递增趋势特别显著;而年降水量序列趋势性不显著,无明显的递增趋势。

(4)年际气候周期性分析对黄河源区 1960 - 2016 年年均气温和降水量序列进行 Morlet 小波分析、小波模方分析与小波方差分析,绘制小波系数实部等值线图、小波模方等值线图与小波方差图,结果显示年均气温存在着 10、5 与 23 a 的周期变化且 10 a 为第一主周期,年降水量存在着 28、11 与 8 a 的周期变化且 28 a 为第一主周期。

参考文献:

[1] 李克让. 全球气候变化及其影响研究进展和未来展望[J]. 地理学报,1996,(S1):1 - 14.

[2] 邓慧平,吴正方,唐来华. 气候变化对水文和水资源影响研究综述[J]. 地理学报,1996(S1):161 - 170.

[3] 李 林,申红艳,戴 升,等. 黄河源区径流对气候变化的响应及未来趋势预测[J]. 地理学报,2011,66(9):1261 - 1269.

[4] 谷源泽,李庆金,杨风栋,等. 黄河源地区水文水资源及生态环境变化研究[J]. 海洋湖沼通报,2002(1):18 - 25.

[5] 史玉品. 黄河源区气候变化及其对水资源的影响[D]. 南京:河海大学,2006.

[6] 张森琦,王永贵,赵永真,等. 黄河源区多年冻土退化及其环境反映[J]. 冰川冻土,2004(1):1 - 6.

[7]李开明,李绚,王翠云,等. 黄河源区气候变化的环境效应研究[J]. 冰川冻土,2013,35(5):1183 - 1192.

[8] 唐共地,包 赢. 基于有序聚类分析法和 Mann - Kendall 法的水沙系列突变点研究[J]. 江淮水利科技,2015(6):35 - 37.

[9] 刘 琦,孙冰心. M - K 和滑动 T 确定穆棱河流域径流变化突变时间[J]. 黑龙江水利,2015,1(7):35 - 37.

[10] 邓 鹏,李致家. 近 50 年淮河流域年降水量变化分析[J]. 水电能源科学,2013,31(4):14 - 17.

[11] 王线朋. 沙颍河上游区降水特性分析[J]. 水文,2000(1):53 - 55.

[12] 池 政,陈振孝,王曦谦,等. 晋西北地区近60a 来的气候变化特征[J]. 价值工程,2017,36(29):121 - 124.

[13] 康 颖,张磊磊,张建云,等. 近 50a 来黄河源区降水、气温及径流变化分析[J]. 人民黄河,2015,37(7):9 - 12.

[14] 王文圣,丁 晶,李跃清. 水文小波分析[M]. 北京:化学工业出版社,2005.

[15] 李国栋,田海峰,彭剑峰,等. 基于小波和 M - K 方法的商丘气温时间序列分析[J]. 气象与环境学报,2013,29(3):78 - 84.

[16] 罗栋梁,金会军. 黄河源区玛多县 1953 ~ 2012 年气温和降水特征及突变分析[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(11):185 - 192.

[17] 杨特群,饶素秋,陈冬伶. 1951 年以来黄河流域气温和降水变化特点分析[J]. 人民黄河,2009,31(10):76 - 77.

[18] 李晓英,姚正毅,王宏伟,等. 近 52a 黄河源区降水量和气温时空变化特征[J]. 人民黄河,2015,37(7):16 - 21.

[19] 白路遥,荣艳淑. 气候变化对长江、黄河源区水资源的影响[J]. 水资源保护,2012,28(1):46 - 50 + 70.

[20] 刘光生,王根绪,胡宏昌,等. 长江黄河源区近 45 年气候变化特征分析[J]. 资源科学,2010,32(8):1486 - 1492.